在天然气处理厂和增压站内进行针对性检修

DIRECTED INSPECTION AND MAINTENANCE AT GAS PROCESSING PLANTS AND BOOSTER STATIONS

1 内容提要

天然气处理厂和与之相关的压缩机增压站估计每年向大气中排放的甲烷气量达到 360 亿立方英尺。其中来自天然气处理厂的超过 240 亿立方英尺的甲烷气是从泄漏的压缩机和其他设备（如阀门、接头、密封口和开口管线）处排放到大气中的。实施针对性检修（DI&M）计划是一种探测、测量、优先处理和维修泄漏设备以减少甲烷排放量的业已证明的、经济有效的方法。

DI&M 计划首先进行基准线调查以识别和定量描述设备泄漏情况。接下来以维修费用、维修后的预期寿命以及投资回收期等作为评判标准，仅对那些可以取得经济效益的设备进行维修。在计划执行过程中，以前期调查数据为基础来设计下一步的调查方案，这样可使得作业者将精力主要集中在那些最有可能发生泄漏并且维修起来有利可图的设备上。天然气 STAR 计划合作伙伴的天然气处理厂的调查结果表明，甲烷排放量的绝大部分来自数量相对较少的泄漏设备。阀门是最大的排放源（占 30%），其次是接头（占 24%）和压缩机密封（占 23%）。剩余 23%的甲烷排放量主要是来自开口管线、曲柄箱排气孔、卸压设备和泵密封。

天然气 STAR 计划合作伙伴报道，通过实施 DI&M 计划，可节省大量资金和大幅度减少甲烷气排放量。由 EPA 和天然气工业技术协会（GTI）在 4 个天然气处理厂实施的现场先导试验结果表明，在天然气处理厂实施 DI&M 计划能将甲烷排放量减少 96%，并且每个天然气处理工厂还可以节约高达 164 000 美元的资金。

泄漏源	甲烷排放量	减小甲烷泄漏的方法	潜在的减排量	计划运行费用	合作伙伴节省费用（气体价格按 3 美元/千立方英尺计算）
天然气处理厂和增压站	每个工厂为 45 000～128 000 千立方英尺/年	针对性检修	最高可达 96%，平均为 77%	泄漏源筛查和测量费用为 14 000～50 000 美元，维修费用为 39 000～78 000 美元	每个工厂每年节省 58 000～164 000 美元

2 简介

设备泄漏引起的气体漏失量占天然气处理厂和压缩站每年气体损失量的 80%以上。剩余 20%的气体损失量和排放量来自连续排气口、燃烧设备和火炬系统。天然气 STAR 计划合作伙伴已经证实，实施 DI&M 计划可以从泄漏设备中减少 96%以上的气体损失量，相应地可减少 80%的甲烷泄漏量。本文论述了成功实施 DI&M 计划的实践方法和技术。

3 技术背景

DI&M 计划以一个综合的基准线调查开始，在调查过程中使用相应的工具以辨别发生泄漏的设备。对各个泄漏设备，需要测量泄漏设备的气体泄漏速度、估计维修费用、计算维修投资回收期。

从基准线调查中获得的泄漏数据和维修费用数据都将用于指导下一步的调查工作，这样可使作业者将精力主要集中在那些最有可能发生泄漏并且维修起来有利可图的设备上。

以下部分介绍了各种不同的泄漏源筛查和测量技术，这可作为在天然气处理厂和增压站内实施DI&M 计划的一部分。

3．1 泄漏筛查技术

在 DI&M 计划中，泄漏源筛查对象可能包括综合基准线调查中涉及的所有组成设备，也可能仅集中在会造成巨大甲烷泄漏的天然气处理厂设备上。常用的几种泄漏源筛查技术如下：

★肥皂泡筛查法。肥皂泡筛查法是一种快速、简单、成本非常低的泄漏源筛查方法。这种方法需将肥皂溶液喷洒在尺寸较小且可以触及的设备上，如带丝扣的接头、管道连接处、插头和法兰等。肥皂泡法确定松动接头和连接的位置时非常有效，这些松动的地方可以当场通过拧紧方法来进行修复，并且肥皂泡法还可以快速检查泄漏设备修复的情况。许多定位、测量和修复起来都比较合算的甲烷气泄漏源通常要比用肥皂泡方法发现的细小的泄漏源大。然而，因为肥皂泡法筛查速度快，而且成本可以忽略，因此该方法很容易被纳入日常维护工作中。

★电子仪器筛查法。电子仪器筛查法使用小型手持式气体探测器或“嗅测”仪器为探测可触及的泄漏源提供了另一种快速、便捷的方法。电子气体探测器配备有催化式气含量传感器，用来检测某种特定气体的存在。基于仪器的灵敏性，在周围烃类气体浓度已升高的地方要将泄漏源探测出来就会比较困难。电子气体探测器可以用来探测较大的泄漏源，而这种地方已不适合使用肥皂泡法。

★有机蒸汽分析仪（OVAs）和有毒蒸汽分析仪（TVAs）。这两种仪器均是便携式烃类气体探测器，也可以用于识别泄漏源。OVA 是一种火焰电离筛查器（FID），可测量有机蒸汽浓度，测量范围在 9～10 000ppm 之间。TVA 是一种组合装置，包括一个 FID 和一个光电离筛查器（PID），可测量浓度超过 10 000ppm 的有机蒸汽。TVAs 和 OVAs 都能测量泄漏点周围的甲烷浓度。

将探针放在可能发生泄漏的地方即可完成泄漏源筛查工作。当探针沿接触面或开口缓慢移动时，从仪器上就可观测到气体浓度值，一直移动探针直到获得一个最大浓度值为止。这个最大浓度值将被记录下来作为泄漏源筛查值。用 TVAs 筛查泄漏源时的速度有点慢，大约每小时可探测 40 个设备部件，并且仪器需要频繁校正。在大型天然气处理厂，TVA 通常用于挥发性有机化合物（VOC）泄漏的筛查，所以这些仪器很容易被用于甲烷气泄漏的筛查。

图 1 有毒气体分析仪（TVA）（来源：Thermo Environmental Instruments Inc）

★声波泄漏探测。声波泄漏探测使用便携式声波筛查装置，可探测高压气体从孔中逸出时产生的声波信号。当气体从一个高压环境通过泄漏口进入一个低压环境时，气体湍流会产生一个声波信

号，这个信号可被手持式传感器或探针探测到，并可在计量表上读出此声波强度增量。尽管声波探测仪并不测量泄漏速度，但提供了一种泄漏大小的相对的表示方法——高强度或“大声”的声波信号对应着较大的泄漏速度。声波探测仪既可以探测高频信号，也可以探测低频信号。

高频声波探测仪最适合用于泄漏部件用手持式传感器就可以触及的噪声环境中。如图 2 所示，声波传感器直接放在设备孔处探测信号。超声波泄漏探测是另一种泄漏探测方法，可探测在空气中传播频率在 20～100kHz 之间的超声波信号。超声波探测器装备有一个手持式声波探针或扫描器，可以在 100 英尺的距离外感应远处潜在的泄漏源。通过耳机监听声强增加情况就能精确定位泄漏位置。尽管超声波探测对环境（背景）噪音比较敏感，但绝大多数探测器一般都具有频率调整功能，这样探针能够被调整到合适的频率上以将噪声环境中特定的泄漏源探测出来。

图 2 声波泄漏探测器（来源：Physical Acoustics Corp.）

3.2 泄漏测量技术

DI&M 计划的一个重要组成部分是测量气体泄漏速度或已识别泄漏源的气体泄漏体积，这样就可将人力和资源分配到那些维修起来在经济上比较合算的大型泄漏源上。常用的测量技术有四种：

★有毒蒸汽分析仪（TVAs）。 有毒蒸汽分析仪可以用来估计气体泄漏速度。以 ppm 为单位的浓度测定值通过相关方程可以转化为气体泄漏估计值。用 TVAs 测定甲烷泄漏量的一个主要缺点是相关方程一般是一个通用方程，并不是针对具体地点的特定方程。用 TVA 相关方程预测的气体泄漏速度会偏离实际泄漏速度 3～4 个数量级。同样，由天然气 STAR 计划合作伙伴、EPA、天然气调查研究所（GRI——现为 GTI，天然气技术研究所）和美国天然气协会（AGA）共同参与完成的研究发现，用测得的浓度阈值或“门限”值（如 10 000ppm 或 100 000ppm）来确定究竟修复哪一个甲烷气泄漏源在经济上才是合算的时候显得毫无指导价值。因为使用通用的 TVA 相关式会增加测量值的不准确性，所以建立和使用针对具体泄漏地点的特定的相关式在确定实际泄漏速度时会更有效。

★装袋技术。装袋技术通常用于测量泄漏设备的泄漏量。泄漏部件或泄漏开口被封入“袋子”或帆布口袋中。惰性载体气（如氮气）以一个已知的速度流过袋子。当载体气流动达到平衡时，从袋中采集气体样本，测量出样本的甲烷浓度。根据测出的样本甲烷浓度和载体气流动速度，即可计算出气体质量泄漏速度。利用装袋法测量泄漏速度是一种相当准确（误差范围±10%～±15%）但速度缓慢的方法（每小时只能采集 2～3 个样本）。尽管装袋法在直接测量较大的泄漏时很有用，但是对一些体积非常大、难于接近、形状不规则的设备部件来讲，装袋法就不可行了。

★大容量采样器技术。大容量采样器可收集泄漏部件泄漏的所有气体以精确地量化泄漏速度。图 3 所示是用大容量采样器测量泄漏的情况。泄漏气体和泄漏部件周围大量的空气样本通过一个真

空取样胶管引入采样器。大容量采样器装备有两个烃类探测器，分别测量采集样本中烃类气体的浓度和周围环境中烃类气体的浓度。样品测量值要用周围环境烃类气体的浓度进行校正，将测量样本的流速乘以环境气体浓度与样品气体浓度的差值即可计算出气体质量泄漏速度。将烃类气体探测器校正到甲烷在空气中的浓度范围就可以得到甲烷泄漏量。

图 3 使用大容量采样器测量泄漏（来源：Oil&Gas Journal,May 21,2001）

大容量采样器装有特殊的附属设备，用以保证能捕集到所有泄漏气体,同时还能防止接口不受附近泄漏源干扰。大容量采样器测量的泄漏速度可达到 8 立方英尺/分钟，等于每天 11 500 立方英尺的流量。泄漏速度大于 8 立方英尺/分钟的设备,必须用装袋技术或流量计进行测量。相比于装袋技术每小时测量 2～3 个部件而言,利用大容量采样器技术,2 个操作人员每小时可以测量 30 个部件。

★转子流量计法。转子流量计和其它流量计用来测量其它设备无法测量的超大泄漏源。流量计一般是将泄漏源气体导入一个标定管道中。导入的气流吹起管道中的“浮子”，通过这种方式来表示泄漏速度。因为转子流量计体积庞大，所以这种设备最适合用于开口管线和同类部件处的测量，在这些设备处所有气流都可被引导通过流量计。转子流量计和其它流量计设备可以补充利用装袋技术或大容积采样器技术所获得的测量结果。

表 4 总结了上述泄漏筛查和测量技术的用途及使用方法、效果和估计费用。

表 4　筛查和测量技术

设备或技术	用途和使用方法	效果	估计资金费用
肥皂溶液	小的点泄漏源，如接头	只用于筛查	低于 100 美元
电子气体探测仪	法兰、通气孔、大的裂纹和开口管线	只用于筛查	低于 1 000 美元
声波探测仪/超声波探测仪	所有部件。较大的泄漏源、高压气体和不可触及的部件	只用于筛查	1 000～20 000 美元（取决于设备灵敏性、设备尺寸以及附属设备）
TVA（火焰电离探测器）	所有部件	最好只用于筛查。用于测量时需要具体位置处特定的泄漏量相关式。	低于 10 000 美元（取决于设备灵敏性/设备尺寸）
装袋法	大多数可触及的部件	只用于测量，但费时间	低于 10 000 美元（取决于样本分析费用）
大容量采样器	大多数可触及的部件（泄漏速度小于 11.5 千立方英尺/天）	筛查和测量	大于 10 000 美元
转子流量计	非常大的泄漏量	只用于测量	低于 1 000 美元

4 决策步骤

DI&M 计划分四步进行：（1）进行基准线调查；（2）记录结果并确定经济上合算的维修候选对象；（3）分析数据，进行维修，估计甲烷气节约量；（4）制定一个未来检查的调查计划，跟踪监测有泄漏倾向的设备。

第 1 步：进行基准线调查。DI&M 计划一般是先进行基准线筛查以确定出泄漏部件。泄漏部件确定下来后，利用装袋技术、大容量采样器法或 TVA 测量法（有描述特定位置的浓度相关式）精确地测量泄漏速度。合作伙伴们发现，大容量采样器法测量泄漏量是一种经济有效的、快速的、精确度高的方法。

在进行基准线调查之前，天然气处理厂工作人员可能对他们设备部件的数量没有一个准确的统计。初始设备部件估计数量一般比基准线调查中实际遇到的部件数量低 40%。设备部件的数量取决于设备的大小和复杂程度。EPA 和 GRI 在 4 个天然气处理厂进行的基准泄漏探测中发现，设备部件的数量范围从大约 14 200 个（最小的天然气处理厂）到超过 56 400 个（最大的天然气处理厂）。

采用大容积取样法进行彻底的基本情况调查所花的费用是每个部件 1 美元，对一个中等规模的气体处理厂而言，大约需要 15 000～20 000 美元。合作伙伴们发现，在一个正在执行的 DI&M 计划中实施跟踪调查的费用比初始调查的费用要低 25%～40%，因为后续调查的重点仅集中在有可能发生泄漏并且维修成本合算的设备部件上。对一些天然气处理厂的设备部件来讲，泄漏筛查和泄漏量测量工作最好在定期规划的 DI&M 调查计划中完成。对其它一些设备来讲，简单、快速的泄漏筛查工作可以纳入到正常进行的日常操作和维护过程中来完成。一些天然气处理厂培训维护人员进行泄漏探测，而另一些天然气处理厂则雇请外部顾问进行基准线调查。

第 2 步：记录结果并确定维修候选设备。在第 1 步中获得的泄漏测量数据，必须经过评价以准确确定那些维修起来比较合算的泄漏部件。将损失天然气的价值与预计的设备部件费用、人工费用以及修复泄漏设备造成设备停工所折算的费用等进行对比，就能排列出泄漏部件维修的优先次序。某些泄漏部件在现场通过简单地拧紧连接部位就能完成维修作业。而另一些维修则比较复杂，需要设备停工或者安装新部件才能完成维修作业。对于这类维修，工作人员可以先选择在该部件上贴上识别标记，在维修费用有保证的情况下再进行修复。在例行的日常维护过程中也可能发现一些较大的泄漏源，在这种情况下，可以提前进行维护计划，在不用任何额外费用的情况下修复泄漏部件。

一旦识别出泄漏源并测量出其泄漏量后，操作人员应该记录下基准线泄漏数据，这样将来的调查工作就可以集中在泄漏量最大的泄漏部件上。一旦发现了泄漏源，就应该当场进行简单的维修。其它一些泄漏源应该贴上醒目标记以待引起日后的注意。DI&M 调查结果可以采用任何简便的方法或形式进行跟踪。天然气处理厂操作人员应该记录的信息包括：

★ 各个泄漏部件的检验人。

★ 部件类型（例如：放空开口管线 OEL，3 英寸阀门）。

★ 测得的泄漏速度。

★ 调查数据。

★ 预计的年气体损失量。

★ 预计的维修费用。

这些信息将指导后续的泄漏调查工作、排出设备维修的优先次序、跟踪 DI&M 计划的甲烷气节省量和经济效益。

在 4 个合作伙伴的天然气处理厂中，对 100 000 多个设备部件进行了基本情况调查，结果发现只有 3%的设备部件处于泄漏状态。然而，这些泄漏部件的泄漏量占了 4 个天然气处理厂甲烷总排放

量的 82%，总计每年超过 26 500 千立方英尺。结果证明，处于振动状态、使用频率高或有热循环的部件最易发生泄漏。

表 5 列出了天然气处理厂泄漏设备的平均甲烷泄漏量和不同部件的平均泄漏维修费用。表 5 可用来确定在天然气处理厂中哪些泄漏设备有可能发现和维修起来在经济上是合算的。例如，很多大的泄漏源可能与压缩机有关，但是这些泄漏源维修起来的费用却有可能非常高。而另一方面，泄漏接头维修起来却是最便宜的。表 5 表明，诸如法兰、阀门和开口管线等其它一些设备部件可以提供一些经济有效的机会来减少甲烷排放量。

表 5 所选天然气处理厂设备的平均甲烷气泄漏系数和维修费用

部件	无压缩机的天然气处理厂（千立方英尺/年/部件）	往复式压缩机（千立方英尺/年/部件）	离心式压缩机（千立方英尺/年/部件）	平均维修费用（美元）
压缩机放空开口管线（OEL）	—	1 417	2 887	5 000
起动机 OEL	—	1 341	1 341	—
现场放空 OEL	742	—	—	75
其它 OEL	43	—	—	65
压缩机密封部件	—	1 440	485	2 000
阀门	25	—	—	130
卸压阀	3.9	308	—	150
汽缸阀盖；燃料阀	—	127	63.4	125
连接处	6.7	—	—	25
法兰	88.2	89.7	115	150

来源：甲烷泄漏系数表示的是两个研究报告中报道的甲烷泄漏量的平均测量值(U.S. EPA, Gas Research Institute (now the Gas Technology Institute), and Radian Intl., 1996, Methane Emissions from the Natural Gas Industry, Volume 8: Equipment Leaks;and Gas Technology Institute and Clearstone Engineering, 2002, Identification and Evaluation of Opportunities to Reduce Methane Losses at Four Gas Processing Plants.)。维修费用取 2000 美元，该数据来自 GTI/Clearstone 的研究结果。

注：对甲烷泄漏系数进行了调整，将天然气中甲烷平均体积百分数（即 87%）的影响考虑在内。同样，对泄漏系数也进行了调整，将占总数 11%的使用火焰的压缩机和不使用天然气启动机的压缩机的影响也考虑在内。

第 3 步：分析数据，估计气体节省量。通过比较预计的维修费用和测得的气体泄漏速度，可以决定泄漏源维修在经济上是否合算。经济有效的设备维修是 DI&M 计划获得成功的一个关键，因为只有维修那些可以获得经济效益的泄漏源才能最大程度地节省成本。

对 4 个天然气处理厂的泄漏设备和估计维修费用进行调查的结果发现，对于投资回收期为 6 个月或少于 6 个月的情况，维修 78%的泄漏部件在经济上是合算的。此外，维修 92%的泄漏部件，其投资回收期不到 1 年；维修 94.5%的泄漏部件，其投资回收期不到 4 年。

表 6 列出了在一个天然气处理厂中修复 10 个最大的泄漏源可能带来的气体节省量。这个表说明，为确定维修哪个泄漏源才合算时，应对各个泄漏源进行计算。

天然气 STAR 计划合作伙伴发现，分析基准线调查结果的一个有效的方法是制作一个表格，列出所有的泄漏点和它们所需的维修费用、预期气体节省量以及维修的预期寿命。应用这个信息，各个泄漏点维修的经济指标（例如净现值或投资回收期）就能很容易计算出来。合作伙伴就可以进一步确定哪个泄漏部件维修起来才合算。

表 6　一个天然气处理厂维修 10 个最大的泄漏源所带来的潜在的气体节省量

部件	节省的气体量（千立方英尺/年）	节省气体的价值，气体价格为 3 美元/千立方英尺(美元/年)	维修费用（美元）	投资回收期
塞阀（在阀体底部发生泄漏）	4 214	12 642	200	5～6 天
燃气管线连接处	4 052	12 156	100	3～4 天
丝扣连接处	3 482	10 446	10	立即
火炬管线上的塞阀	3 030	9 090	200	8 天
调节器	2 572	7 716	200	10 天
在压缩机气缸上的隔板	2 550	7 650	2 000	3 个月
开口管线	2 320	6 960	60	3～4 天
燃气管线连接处	2 204	6 612	100	5～6 天
压缩机密封件	1 928	5 784	2 000	4 个月
闸阀	1 576	4 728	60	4～5 天
总计	**27 928**	**83 784**	**4 930**	**21 天**

表 7 和表 8 说明了不同类型的分析方法，对某个选定的天然气处理厂部件，通过完成表中的分析即可确定 DI&M 计划的相对盈利能力。费用数据、泄漏部件数量和泄漏部件的平均泄漏系数等信息来自 4 个天然气处理厂进行的先导性现场试验研究的结果。表 7 给出了初始基准线调查以及维修泄漏接头、卸压阀、开口管线（OEL）和其它阀门等的基本费用。表 8 利用表 7 所列的基本费用对选定的设备部件进行 DI&M 经济分析。

表 7 用于天然气处理厂设备部件 DI&M 现金流分析的基本费用

部件类型		每个天然气处理厂的设备部件数量（个）	预计调查费用（美元）	假设 3%的部件发生泄漏	预计维修费用（美元/部件）	总维修费用（美元）	发现及维修总费用（美元）
连接/接头	与压缩机有关	2 135	2 135	64	5	320	2 455
	与压缩机无关	7 664	7 664	230	—	0	7 664
	总计	9 799	9 799	294			10 119
卸压阀	与压缩机有关	13	13	1	150	150	163
	与压缩机无关	48	48	1	150	150	198
	总计	61	61	2			361
OEL	压缩机放空 OEL	15	15	1	5 000	5 000	5 015
	压缩机起动机 OEL	15	15	1	1 000	1 000	1 015
	现场放空 OEL	1	1	1	75	75	76
	其它 OEL－与压缩机无关	171	171	5	65	325	496
	总计	202	202	8			6 602
其它阀门	与压缩机有关	309	309	9	175	1 575	1 884
	与压缩机无关	1 825	1 825	55	130	7 150	8 975
	总计	2 134	2 134	64			10 859
来源：费用数据和部件数量来自 2000 年 GTI/Clearstone 的研究结果。假设在现场通过拧紧方式就能完成与压缩机无关的接头维修，其维修费用为 0。							

表 8 天然气处理厂设备部件 DI&M 计划经济分析

部件类型		发现和维修总费用（美元）	气体节省量（千立方英尺/部件/年）	每年气体节省量（千立方英尺）	节省气体的价值[1]（美元/年）	第一年现金流（美元）	第二年现金流（美元）	NPV（美元）	投资回收期（年）
连接接头	与压缩机有关	2 455	6.7	429	1 287	（1 168）	1 287	2	1.9
	与压缩机无关	7 664	6.7	1 540	4 621	（3 043）	4 621	1 053	1.6
	总计	10 119	6.7	1 970	5 909	（4 210）	5 909	1 056	1.7
卸压阀	与压缩机有关	163	308	308	924	761	924	1 455	0.2
	与压缩机无关	198	3.9	4	12	（186）	12	（160）	16.9
	总计	361		312	936	575	936	1 296	0.4
OEL	压缩机放空	5 015	2 152	2 152	6 456	1 441	6 456	6 646	0.8
	压缩机起动机 OEL	1 015	1 341	1 341	4 023	3 008	4 023	66 059	0.3
	现场放空 OEL	76	742	742	2 226	2 150	2 226	3 794	0.3
	其它 OEL－与压缩机无关	496	43	215	645	149	645	669	0.8
	总计	6 602		4 450	13 350	6 748	13 350	17 168	0.5
其它阀门	与压缩机有关	1 884	95	855	2 565	681	2 565	2 739	0.7
	与压缩机无关	8 975	25	1 375	4 125	（4 850）	4 125	（1 000）	2.2
	总计	10 859		2 230	6 690	（4 169）	6 690	1 739	1.6

[1]气体价格按 3 美元/千立方英尺计算

假设：平均维修使用寿命是 2 年。泄漏数据取 EPA/GRI/Raiian 研究和 GTI/Clearstone 研究测得的平均泄漏量。NPV 贴现率 10%。

表 8 说明，DI&M 计划对诸如开口管线和与压缩机有关的卸压阀等这类泄漏部件来讲在经济上是合算的。这些部件相对来说容易定位、筛查和测量，而且在节省气体排放量方面有很大的潜力。与压缩机相关和无关的连接（接头）维修起来在经济上同样也是合算的。然而，这些部件潜在的经济效益可能受到限制，因为这些连接（接头）的平均泄漏速度小，并且发现和维修这些数量庞大的泄漏连接（接头）所需的费用很高。当能进行现场维修时（如拧紧一个松动的接头），则可以使得经济效益达到最大化。对于其它的阀门，DI&M 计划的经济效益则取决于泄漏的规模、潜在的气体节省量

和维修费用。表 8 说明，对于与压缩机有关的泄漏阀门，DI&M 计划在经济上是合算的，但对于其它那些平均泄漏速度较小的阀门来讲则可能并不合算，除非泄漏调查和维修可以纳入到日常维护作业中。

第 4 步：为将来的 DI&M 制定一个调查计划。DI&M 计划的最后一步是应用最初的基准线调查结果制定一个调查方案，以指导将来的设备检修工作。一个有效的 DI&M 调查计划应该包括以下几方面内容：

★ 一个需要进行筛查和测试的设备部件列表以及排除在调查之外的设备部件列表。

★ 泄漏筛查和测量工具，收集、记录和存取 DI&M 数据的方法。

★ 泄漏筛查和测量计划。

★ 泄漏维修的经济指南。

★ 前期检修工作的结果和分析，可以用来指导后续 DI&M 调查。

操作人员应该制定一个 DI&M 调查计划，该计划要达到最经济有效地节省气体排放量，同时还要适合自身设备的特点和操作规程。有些合作伙伴基于前期调查过程中估计的维修寿命来制定 DI&M 调查计划。而其它一些合作伙伴则基于公司的维护周期和可用资源来制定跟踪调查的频率。因为 DI&M 计划操作起来是比较灵活的，如果后续调查发现许多大的泄漏或者重复泄漏的话，操作人员可以增加 DI&M 计划的跟踪调查频率。跟踪调查可以集中在前次调查过程中进行维修的部件上，或者集中在被认为最容易发生泄漏的部件上。经过一段时间，当出现泄漏情况时，操作人员可以继续调整调查的范围和频率。

5 预计收益

执行 DI&M 计划潜在的气体节省量将因天然气处理厂的年限和规模、DI&M 计划中包括的部件数量和类型、设备操作特点等的不同而有所不同。天然气 STAR 合作伙伴发现，基准线调查的初始费用能很快从节省的气体中回收回来。下面介绍了 DI&M 计划中节省气体排放的两个例子。第一个例子是 EPA/GTI 共同在 4 个天然气处理厂进行的先导性现场研究，第二个例子是天然气 STAR 计划合作伙伴 Dynegy 公司进行现场研究。

5.1 在 4 个天然气处理厂进行的 DI&M 先导性试验研究

EPA/GTI 选择在 4 个天然气处理厂进行了泄漏设备针对性检修的先导性现场试验。天然气处理厂运行年限从 20～50 年不等，日处理能力从 60～210 百万立方英尺/天不等。利用肥皂泡法和便携式烃类气体探测器进行泄漏源探测。在泄漏部件上贴上标签，并用大容量气体采样器测量泄漏速度。表 9 说明由于设备发生不稳定泄漏造成的年气体损失量和实施 DI&M 计划从 4 个天然气处理厂中可能节省的气体量。该先导性试验研究的主要成果如下：

表 9　4 个天然气处理厂实施 DI&M 计划预计的潜在的气体节省量（先导性现场试验）

现场	现场排放量（千立方英尺/天）	年气体损失体积（千立方英尺/年）	损失气体的价值[1]（美元/年）	泄漏维修减排幅度（%）	基本情况调查费用（美元）	总维修费用（美元）	净节省费用[1]（美元/年）
1	123	44 895	134 685	90%	16 050	44 725	60 442
2	207	75 555	226 665	95%	14 424	39 300	161 608
3	352	128 480	385 440	50%	56 463	77 900	58 257
4	211	77 015	231 045	96%	14 168	43 450	164 185
总计	893	325 945	977 835	77%	101 105	205 375	444 592

[1]气体价格按 3 美元/千立方英尺计算

★ 在各个进行先导性试验的天然气处理厂中，估计每个部件的基准线调查费用为 1 美元，或者每个天然气处理厂所用的总的基准线调查费用在 15 000～20 000 美元之间。

★ 阀门、接头、压缩机密封件和开口管线占了甲烷气泄漏总量的绝大部分。

★ 在所有设备部件中，发生泄漏现象的设备部件数量少于 3%。

★ 在个别天然气处理厂发现的泄漏源中，有 50%～96%的泄漏源经维修后在经济上是合算的。

★ 维修费用从可以忽略不计到 5 000 美元不等，这取决于设备部件的类型和维修性质。预计大部分维修设备的运行寿命为 2 年。

5．2 Dynegy 公司进行的现场研究

Dynegy 公司（天然气 STAR 计划合作伙伴之一）在 2 个天然气处理厂进行了 DI&M 计划先导性现场试验。2 个天然气处理厂的规模都很大（天然气处理量大于 5 千万标准立方英尺/天），大约运行了 35 年。一个天然气处理厂处理无硫气体，另一个天然气处理厂处理酸性气体。使用肥皂泡法、便携式烃类气体探测器和超声波探测器进行泄漏筛查。采用大容量采样器法和装袋法测量气体泄漏量，当泄漏速度超过大容量采样器测量上限时则采用转子流量计测量气体泄漏量。对各个已探明的泄漏点，通过比较维修或更换设备所需的费用与一年内节约气体产生的价值，就可以确定出在经济上合算的甲烷气减排机会。表 10 总结了这一先导性现场试验的成果。

表 10 合作伙伴经历——Dynegy 公司 DI&M 计划先导性现场试验研究

初始基础情况调查费用	35 000 美元（每个处理厂 15 000～20 000 美元）
两个处理厂中调查的总的设备部件数量	30 208
总的泄漏部件数量	1 156（3.8%）
泄漏设备维修所占总设备的百分数	一个天然气处理厂为 80%，另一个天然气处理厂为 90%
每年总的甲烷气减排量	100 000 千立方英尺/年
年节省费用（气体价格按 3 美元/千立方英尺计算）	300 000 美元/年
后续调查计划（基于设备维修的预期寿命）	每 3 年一次

6 经验总结

DI&M 计划是一种已经证明的经济有效地减少甲烷排放量的管理方法。最近在 4 个天然气处理厂实施的 DI&M 计划表明，在天然气处理区实施 DI&M 计划具有很大的潜在的甲烷减排能力。从天然气 STAR 合作伙伴那里得到的主要经验有：

★ 初始基准线调查费用在第一年内就可从节省的气体量中回收回来。在后续调查过程中，将注意力集中在早期调查中确定出来的最容易发生泄漏的设备部件上，这样可以节省大笔的后续调查费用。

★ 合作伙伴估计，后续跟踪调查的费用将会减少 25%～40%，因为后续调查仅将重点放在那些最易发生泄漏并且维修后能获利的设备部件上。

★ 任何 2 个天然气处理厂的情况都是不一样的。经济有效地节省气体排放的机会也大不相同，这取决于天然气处理厂的运行年限和规模、设备类型以及上一次进行设备大型维护后到目前的工作时间等因素。

★ 结合使用筛查和测量仪器可以获得精确的泄漏数据。大容量气体采样器是一种确定泄漏源和量化泄漏量的有效工具。

★ DI&M 计划应该将目标集中在以下五类设备上：截断阀、控制阀、接头、压缩机密封件和开

口管线。这五类设备的甲烷排放量在总的甲烷排放量中占据绝大部分。

★ 如果可能，合作伙伴应该首先维修泄漏最严重的设备部件。特别是当只有少数几个泄漏部件的泄漏量占了甲烷泄漏总量的很大部分的时候。

★ 诸如阀门、法兰、接头和开口管线等这类设备部件的维修费用一般由部件大小决定，大部件维修费用高于小部件维修费用。

★ 小型泄漏源的维修可以纳入例行的设备维护过程中。需要停止系统运转的维修可以安排在下次计划好的停工间歇进行。

★ 在调查过程中，可以实施“快速维修”步骤，对简单问题（例如松动的阀杆盘根、没有完全关闭的阀门）进行简单维修。

★ 进行维修后，需要筛查或测量泄漏部件以确认设备维修的有效性。肥皂泡筛查法是一种检查维修有效性的快速方法。使用大容量采样器进行维修后测量可以量化并记录气体节省量。

★ 在天然气 STAR 计划报告中记录各个天然气处理厂和/或增压站的甲烷减排量以及年减排量。

7 参考文献

Ananthakrishna, S. and Henderson, C., 2002, Cost-effective Emissions Reductions Through Leak Detection, and Repair, Hydrocarbon Processing, May 2002.

Clearstone Engineering, 2002, Identification and Evaluation of Opportunities to Reduce Methane Losses at Four Gas Processing Plants, internal report prepared under U.S. EPA Grant No. 827754-01-0 for Gas Technology Institute, Des Plaines, IL.

Connolly, Jan, Toxic Vapor Analyzers, personal communication.

Frederick, J., Phillips, M., Smith, G.R., Henderson, C., Carlisle, B., 2000, Reducing Methane Emissions Through Cost-Effective Management Practices, Oil & Gas Journal, August 28, 2000.

Gas Technology Institute (formerly the Gas Research Institute), personal communication.

Henderson, Carolyn, U.S. EPA Natural Gas STAR Program, personal communication.

Henderson, C., Panek, J., Smith, M., Picard, D., 2001, Gas-Plant Tests Reveal Cost-Effective Inspection and Maintenance Practices, Oil & Gas Journal, May 21, 2001.

Howard, Touché, Indaco Air Quality Services, Inc., personal communication.

McMillan, L.W. and Henderson, C., 1999, Cost-Effectively Reduce Emissions for Natural Gas Processing, Hydrocarbon Processing, October 1999.

Mohr, Gary, UE Systems Inc., personal communication.

Phillips, M. and Lott, R., 1999, Emissions Reductions Can Be Cost-Effective, Pipeline and Gas Journal, October 1999.

Radian International, 1996, Methane Emissions from the Natural Gas Industry, Volume 2, Technical Report, Report No. GRI-94/0257.1, Gas Technology Institute (formerly Gas Research Institute), Chicago, IL.

Radian International, 1996, Methane Emissions from the Natural Gas Industry, Volume 8, Equipment Leaks, Report No. GRI-94/0257.1, Gas Technology Institute (formerly Gas Research Institute), Chicago, IL.

Tamutus, Terry, Physical Acoustics Corporation, personal communication. 17 Tingley, Kevin, U.S. EPA Natural Gas STAR Program, personal communication.